

地铁场景下 5G 网络立体覆盖方案的探究

王玺^{1,2}, 杨峥^{1,2}, 张鹏^{1,2}, 舒琴^{1,2}, 潘鑫^{1,2}

(1. 中国移动通信集团设计院有限公司湖北分公司, 湖北 武汉 430021;

2. 中国移动通信集团有限公司湖北分公司, 湖北 武汉 430021)

摘要: 地铁作为城市动脉和大众化的交通工具, 是最具可持续性的交通运输方式, 随着地铁等轨道交通运营里程的增长、客运量的提升, 其在运营、维护、安防、调度等方面均面临更大的挑战, 亟须信息化手段来提升地铁运营服务水平, 而地铁信息化的基础则是有效的室内网络覆盖。目前涉及室外广域、室内密闭静止场景、室内密闭高速运动场景等多场景覆盖要求, 针对不同覆盖场景, 如选择相同网络方式覆盖, 可能存在成本较高、覆盖效果不佳的问题。因此, 针对地铁网络覆盖, 需要灵活组合宏基站、微基站、室分、泄漏电缆等方式, 结合切片、资源块 (RB, resource block) 保障、自动越区切换、自动登录等保障技术, 在成本最优的条件下, 满足网络的无感切换、高数据速率、低时延、高容量和大规模连接等指标要求, 确保地铁场景下 toB 及 toC 业务正常运行。探讨了地铁场景下 5G 网络立体覆盖方案, 为其他地铁专网覆盖提供了重要的参考依据。

关键词: 地铁; 5G 网络; 多覆盖场景; 无线网络覆盖; 无感切换

中图分类号: TN92

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2023.00357

5G network stereo coverage scheme in subway scenario

WANG Xi^{1,2}, YANG Zheng^{1,2}, ZHANG Peng^{1,2}, SHU Qin^{1,2}, PAN Xin^{1,2}

1. Hubei Branch of China Mobile Group Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430021, China

2. Hubei Branch of China Mobile Communications Group Co., Ltd., Wuhan 430021, China

Abstract: As an urban artery and popular means of transportation, the subway is the most sustainable way of transportation. With the increase in operating mileage and passenger volume of subway and other rail transit, it faces greater challenges in operation, maintenance, security, scheduling, and other aspects. There is an urgent need for information technology to improve the level of subway operation services. While the foundation of subway informatization is effective indoor network coverage. At present, there are coverage requirements of multiple scenario such as outdoor wide area, indoor enclosed static scenes, and indoor enclosed high-speed sports scenes. For different coverage scenarios, if the same network method is chosen for coverage, there may be problems of high cost and poor coverage effect. Therefore, for the coverage of the subway network, it is necessary to flexibly combine macro station, micro station, room separation, leakage cable and other methods, combined with resource block (RB) guarantee, automatic handover, automatic login and other guarantee technologies, to meet the requirements of the network's indicators such as insensitive switching, high data rate, low latency, high capacity, and large-scale connection under the optimal cost conditions, to ensure the normal operation of toB and toC business in subway scenarios. The 5G network stereo coverage scheme was studied in subway scenario, providing important reference for the coverage of other subway specialized networks.

Key words: subway, 5G network, multiple coverage scenarios, wireless network coverage, senseless switching

0 引言

地铁作为城市动脉和大众化的交通工具,是最具可持续性的交通运输方式之一^[1],对我国经济社会发展、民生改善和城市安全起着全局性支撑作用^[2-4]。5G网络、城际高速铁路和地铁、大数据中心、人工智能、工业互联网等七大领域位列其中,范围涉及诸多产业链。

地铁产业链长、带动效应强,自身也正迎接智能化、电气化、轻型化等发展趋势,与“新基建”中的5G、人工智能等高科技产业紧密衔接,可以起到增强“新基建”^[5]的经济带动作用。在此背景下,5G技术与地铁行业将迎来重大历史发展契机。

目前,地铁场景缺乏同时服务于企业及个人用户的专网应用案例,在地铁立体的覆盖场景需求中,运营商如何灵活选择最优方案建网,在最低建网成本下实现最佳覆盖效果,仍需继续探讨。

1 地铁中应用无线通信技术的趋势和现状

我国地铁交通在十多年前进入快速发展期,随着线路长度、机车数量、客运数量等指标不断攀升,现已成为世界最大的地铁建设市场。当时可供选择的无线通信系统主要有常规无线通信、模拟集群、数字集群等方式,产品选择余地很小。其中,常规无线通信和模拟集群系统由于频率和设备资源等利用率不高、传输数据的效率和可靠性低等诸多原因,其建设和应用受到国家政策的严格限制,除了作为临时或过渡措施,原则上不能作为轨道交通无线通信系统。可供选择的技术只有陆地集群无线电(TETRA, terrestrial trunked radio)的方式。

以我国中部某市为例,其已建成十余条地铁线路,全部已建成项目及在建项目都采用了无线通信系统为800 MHz的TETRA通信制式方案。但TETRA系统是基于全球移动通信系统(GSM, global system for mobile communications)发展而来的一个窄带数字集群,只能提供语音+低速率数据业务。而5G技术是目前通信技术发展的主流趋势,可以较好地解决该场景下语音与数据通信的基本需求。

目前,该市地铁业务多网并存,人工操作并存,运维复杂。TETRA作为独立窄带语音集群,

会导致线路间、地上地下无法互通,沟通效率低,现网存在大量车载闭路电视(CCTV, closed-circuit television)、乘客信息系统(PIS, passenger information system)视频、车辆运行数据等,目前主要通过线下数据复制的方式开展业务,人工效率低、创新业务受限;近几年,虽然部署了部分Wi-Fi,但仅承载部分业务,通信存在干扰。

以该市某地铁线路为例,其业务包括业务系统、集群通信、行车数据、PIS等,目前通过LTE-M(long term evolution-machine-to-machine)、TETRA、无线局域网(WLAN, wireless local area network)、线下数据复制等多种方式进行承载,多网并存带来了较高的运维成本,在运行安全、运行效率、运维效率等方面也存在一定问题。该市某地铁线路典型业务及网络分析如图1所示。

2 地铁无线网络需求与痛点

随着地铁运营里程的增长、客运量的提升,地铁在运营、维护、安防、调度等方面均面临更大挑战。对现在的城轨需求而言,构建智慧地铁运营平台,全面提升地铁运营服务水平,是地铁未来发展的重要方向。本节以该城市某地铁为例,分析其中需求的具体痛点,明确本文研究需要解决的问题。

2.1 地铁无线网络需求痛点

通过前期多方面调研,城市地铁无线网络在业务侧有以下痛点,需要通过立体、全方位的网络覆盖来解决,详情如下。

1) 痛点1: 车载视频上传

地铁车载视频主要分为两个部分:在司机驾驶室区域,该区域需要安装摄像机对司机进行监控,确保车辆安全。在列车自动驾驶阶段也需要安装部分高清摄像机,对列车运行状况进行实时监测。在车厢内部区域,为确保乘客的安全,每节车厢分别安装4个摄像机。在一些情况下需要实时的视频进行监控,以应对突发的公共安全事件。同时可以对视频数据做进一步开发,通过视频分析判断车厢拥挤情况以及帮乘客及时寻找丢失物品等^[6]。

2) 痛点2: PIS视频下发

地铁车厢移动电视广告是指以地铁车厢移动电视为媒介载体的视频广告形式。以某市某地铁

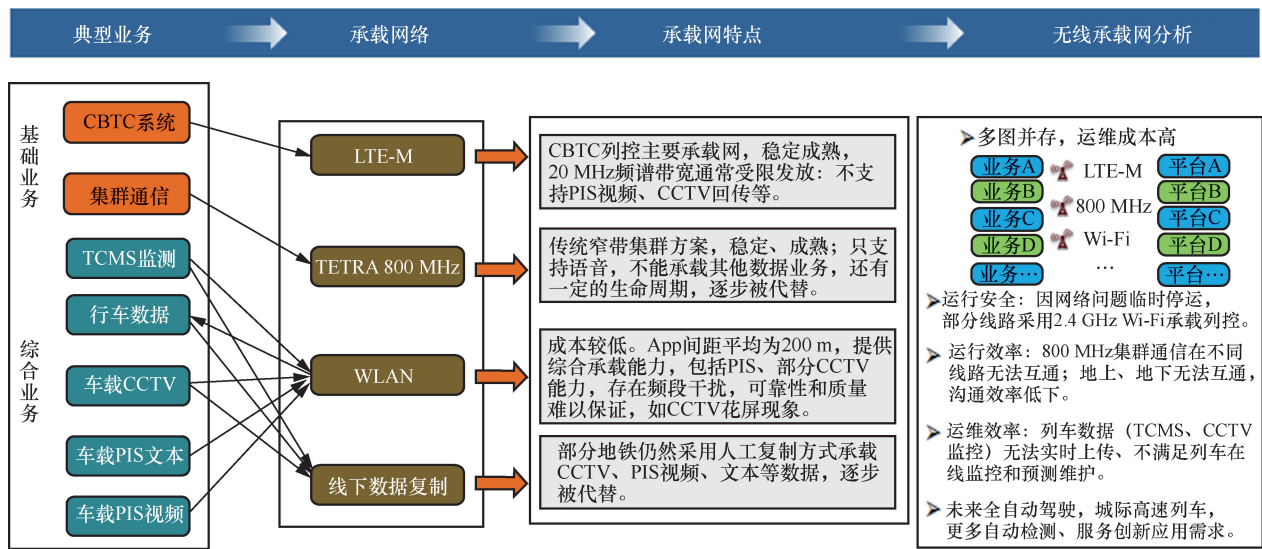


图 1 该市某地铁线路典型业务及网络分析

为例，因在站台区域及轨道内网络带宽不足，数据传输较慢，地铁部分线路的 PIS 还是采用人工复制更新的方式完成。一个月对节目做 2~3 次更新。节目在列车上循环播放，商业价值不明显，无法发挥车载 PIS 屏幕的价值。通过 5G 网络的高带宽可以实现对 PIS 节目的实时下发，及时更新群众所关心的内容，带来新的商业价值并提升乘客满意度。

3) 痛点 3: LTE-M 失效

当前地铁列控系统 LTE-M 系统的频谱范围为 1 785~1 805 MHz，由于地铁内有多个商用通信系统，在某些区域、某些情况下会出现 LTE-M 系统的干扰。例如，中国移动网络的下行频谱为 1 805~1 830 MHz，如果出现配置不当等操作问题，可能会导致列车接收不到控制信号，无法正常运行。此外，LTE-M 设备本身也有一定概率出现故障，尤其是对于全自动运行线路，问题更加严重。随着 5G 产业的发展，基于通信的列车自动控制系统（CBTC, communication based train control system）可以在 5G 网络上实现备份，当列控系统受到干扰时，可以自动切换到 5G 频谱上，实现业务不中断。

4) 痛点 4: 远程驾驶

随着全自动运行成套技术的应用，对运行的列车增加 5G 远程驾驶功能更加迫切，尤其是当列车出现停车故障时，司机应能远程控制列车运行。5G 大带宽和低时延能力可以为远程驾驶提供网络保障，并通过增强现实（AR, augment reality）技术，

辅助实现远程驾驶。

5) 痛点 5: 应急对讲

乘客车厢、车站的应急对讲实现较为烦琐，需要跨多个系统，如广播系统、TETRA 系统、WLAN 系统等，尤其是车载广播，二次开发工作量较大。通过设置多种形态的 5G 终端，可以快速升级既有车站及车辆的应急对讲功能，轻松实现运营中心、司机与乘客的视频可视对讲。

2.2 网络详细要求

基于以上痛点，在该城市某地铁场景中，对网络通信分析出详细的功能需求，详情如下。

2.2.1 通话功能

通话功能是地铁无线数字集群通信的主要且基本的功能，地铁中需要的通话功能具体包括单呼、组呼、通播组呼叫、紧急呼叫、电话互联呼叫、车组号呼叫、车次号呼叫、无线广播等功能。

2.2.2 数据信息承载功能

地铁无线网络应具有数据信息承载功能，可为移动终端之间、移动终端和固定用户之间提供分组数据无线传输、分组数据重发、分组数据路由转发、虚拟专用网（VPN, virtual private network）功能、虚拟局域网（VLAN, virtual local area network）功能（不同类型的数据经由不同的 VLAN 进行传输，控制广播风暴区域）、服务质量（QoS, quality of service）分级控制功能（支持不少于 9 级 QoS 优先级定义^[7]）、有线多播传输及空口组播功能；可为移动用户（车载台、手持台）之间、移动用户（车载台、手持台）与调度终端之间提供双向数据信息的

传送。同时需要具有 PIS、CCTV、车辆状态信息等系统业务承载能力。

2.2.3 融合通信功能

地铁集群调度平台需要支持融合通信功能，该业务是指利用 5G 公网进行的应急指挥、线路运营和维护等需要的各种语音、视频、数据呼叫通信和管理业务。通过集群调度平台可实现视频监控、TETRA 集群、公务电话、5G 无线终端等设备的有效接入和统一业务调度，并可与智慧工地、智慧出行相关系统进行交互。

2.3 业务指标要求

针对以上网络详细要求，在该市地铁项目中，提出了如下具体指标要求。

- 语音组呼的呼叫建立时间不大于 300 ms 的概率不小于 95%。
- 语音单呼的呼叫建立时间不大于 500 ms 的概率不小于 95%。
- 话权申请时间不大于 200 ms 的概率不小于 95%。
- 系统无线覆盖在不小于 95% 概率条件下，手持终端天线处输入信号符合参考信号接收功率 (RSRP, reference signal receiving power) 不小于 -105 dBm。
- 每终端上/下行传输速率不小于 2 Mbit/s。
- 话音质量应高于 3 级。
- 呼通率不小于 98%。

本文研究立足于面向地铁场景的无线网络覆盖，服务于地铁场景广覆盖的应用需求，并进一步

提升网络的传输速率、时延、可靠性等网络基础能力，满足现有地铁网络通信要求，并考虑未来业务发展情况，满足更高标准的指标要求。

3 5G 网络立体覆盖方案研究

3.1 5G 网络建设方案

3.1.1 5G 无线网络立体覆盖方案

在地铁场景中，需要覆盖的区域主要包括站厅、站台、出入口和隧道等多个场景，建筑结构复杂，站厅、站台及隧道纵横交错，在换乘站点尤为突出。地铁无线网络需要覆盖的范围示意图如图 2 所示。

经研究，对于地铁无线网络覆盖，针对不同环境需要采用不同的无线网络覆盖方式，以达到最好的覆盖效果，详情如下。

隧道区间主要采用泄漏电缆覆盖方案；车站内、站台、站厅出入通道、换乘通道、紧急疏散通道主要采用 5G 微基站覆盖方案；地面高架段主要采用室外宏基站天线覆盖；车辆基地、车辆段、停车场内地面区域室内主要采用室内分布式天线系统 (DAS, distributed antenna system)，室外主要采用室外宏基站天线覆盖；控制中心、停车检修库等操作库及综合办公楼主要采用室内 DAS 覆盖。

1) 地铁隧道覆盖

隧道区域因无线环境比较封闭，外面无线信号难以进入，隧道内地铁运动速度相对较快，靠近站台移动较慢，地铁隧道长度通常超过 1 km，内部狭

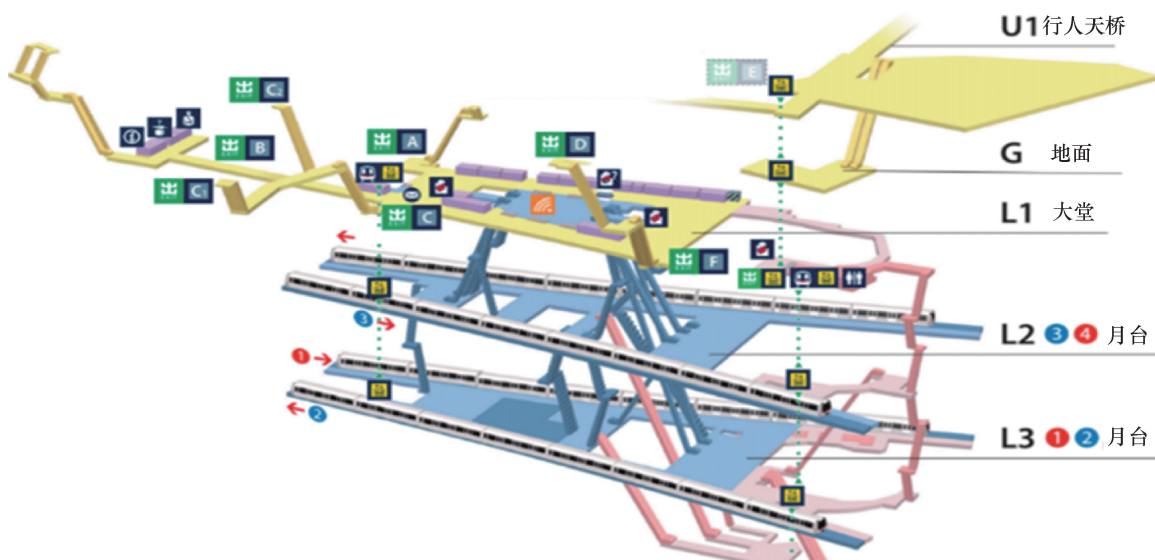


图 2 地铁无线网络需要覆盖的范围示意图

长且可能有弯道，采用定向天线信号掠射角度小，局部信号衰落快，信号易被遮挡。

经研究，在隧道区域，建议使用泄漏电缆进行覆盖。泄漏电缆信号覆盖均匀，尤其适合隧道等狭小空间；泄漏电缆本质上是宽频带系统，某些型号的泄漏电缆可同时用于码分多址（CDMA, code division multiple access）、GSM、宽带码分多址（WCDMA, wideband code division multiple access）、WLAN 等系统^[8-9]。

相比于传统单极天线，泄漏电缆在涉及预测无线电覆盖范围、管理连续接入点之间的交接或减少对分配的无线电频谱的需求时，与传统单极天线相比具有明显优势，有研究表明，泄漏电缆的衰减模型在一定条件下表现为线性的大尺度衰落和正态分布的小尺度衰落。不过，泄漏电缆需要安装大量中继器以补偿传输损耗，初期投入很高，不适合所有场景，其典型应用场景为地铁隧道、地下矿山、建筑物内等传统单极天线难以覆盖的盲区，此外，一般场景下采用泄漏电缆也有利于提高无线信号覆盖的均匀性，降低不同小区之间的干扰，是一种有潜力的无线覆盖解决方案。

由于泄漏电缆可被看作连续的天线或天线阵列，可以把泄漏电缆的组网覆盖与多输入多输出（MIMO, multiple-input multiple-output）研究相结合。一根泄漏电缆可被看作一根完整的天线，使用两根电缆同时进行收发，就可以构成 2×2 MIMO 系统。在泄漏电缆两端输入不同的射频信号使一根泄漏电缆可以作为两根天线使用，只用一根泄漏电缆就可以形成 2×2 的多MIMO信道，并推广为用一根复合电缆实现了 4×4 的MIMO信道，在保证泄漏电缆的MIMO系统容量的同时，减少组网时所需要的设备和空间需求。

2) 站台站厅覆盖

站台站厅主要由车站内站台、站厅、出入通道、换乘通道、紧急疏散通道组成。站厅闸机口、安检口、站台候车区人员密集，容量需求大，设备间及办公区话务量相对较低，站台、站厅、地铁站进出口采用5G微基站覆盖方案。

使用微基站模块对停靠在车站时的地铁车辆进行覆盖，考虑走线、安装等的美观、隐蔽化，将微基站模块安装在站台的两侧，同时往中间区域覆盖，将会起到最好的覆盖效果。站台部署示意图如图3所示。

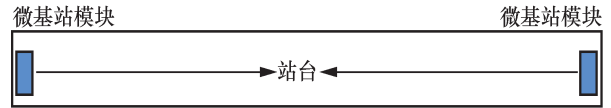


图3 站台部署示意图

3) 地面高架段覆盖

地上部分为开放场景，其场景为列车通过的区域流量需求高，忙闲时间明显。经研究建议采用室外宏基站天线覆盖。

地面高架段通过周边宏基站覆盖，无宏基站区域需要新建宏基站，以确保业务区域连续覆盖。

• 站点规划

为保障车厢内两侧的用户接收信号质量均匀，宏基站应尽量分布于轨道两侧，即相邻站点采用“之”字型的方式分布，这样可以在轨道线上形成比较规则的覆盖，简化邻区关系，缩短切换时间，尤其是在列车会车的时候能保证车内通信质量^[10]。站点规划示意图如图4所示。

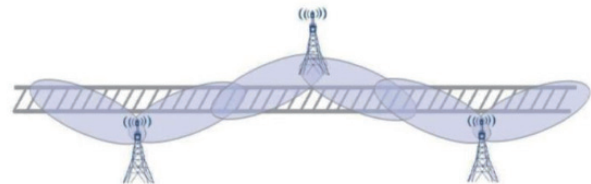


图4 站点规划示意图

• 站点高度设置

站点高度设计要求在保证信号直射的基础上，信号尽量沿径向从列车玻璃穿透，尽量避免信号从车顶穿透^[11]，因此，根据测算，建议天线相对轨轨高度为15~20 m。站高设置示意图如图5所示。

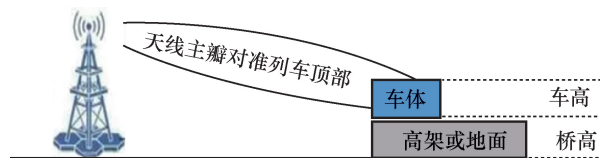


图5 站高设置示意图

4) 车辆段基地覆盖

车辆段基地包括车辆基地、车辆段、停车场内地面区域。经研究，室内建议采用室内DAS覆盖，室外建议采用室外宏基站天线覆盖。

室外宏基站是无线信号发射基站，宏基站覆盖距离大、功率大、容量大、可靠性好。将室外宏基站与室内DAS相结合，可在保证信号覆盖强度的前提下，尽量减少建站数量，节约运营商成本。

5) 控制中心及办公楼覆盖

停车检修库等操作库以及综合办公楼、主备控制中心大楼场景可类比于通常大楼室内覆盖场景，经研究建议采用室内 DAS 覆盖。

室内 DAS 由传统的信源（射频拉远单元）、合路器（多系统合路平台（POI, point of interface））、无源器件（耦合器、功分器等）、馈线及天线组成。使用无源天线作为末端，利用馈线传输模拟信号，期间经过合路器、功分器、耦合器等无源器件，是一种传统的室分建设方式。

在控制中心及办公楼覆盖场景中，采用室内 DAS 方案进行覆盖，一方面，可确保室内的网络覆盖强度；另一方面，与有源室分相比，可大幅度降低建设成本。

3.1.2 核心网网络架构及网络组织

该地铁场景下，5GC 控制面网元在大区中心集中部署，各行业客户分配独立切片，切片间共享控制面网元。控制面网络架构及组织与面向个人用户的独立组网（SA, standalone）一致。为行业客户提供专享的用户面功能（UPF, user plane function），需要下沉 UPF 部署在客户所在园区。行业网与大网关系示意图如图 6 所示。

行业专网核心网与面向大网用户的 SA 网络相对独立，控制面网元（NSSF 和 NRF 两网共用）和用户面网元独立部署。为支持切片重定向，行业专网与面向大网用户的 SA 网络间需要提供交互接口。

行业应用业务模式如下。

1) 无线与频率与大网共享，采用 DNN/QoS 优先调度或切片，满足地铁客户对特定网络速率、时

延及可靠性的优先保障需求。

2) 将用户面与地铁本地业务平台部署于同一机房，一方面有效降低时延，另一方面确保数据不会进入公网，仅在地铁内部流转。

3.1.3 传输网络架构及网络组织

传输网包括前传、中传和回传网络 3 个部分。中传和回传网络的带宽和功能需求基本一致，在本场景中，建议采用切片分组网（SPN, slicing packet network）构建端到端网络进行承载。前传网络主要包括 4 种方案：光纤直驱、无源波分、半有源方案和有源方案。其中，有源方案又包括简化光传送网络的方案和简化 SPN 的方案。

3.2 重点保障技术

为保障在地铁场景下的 5G 网络正常运行，并实现对网络的监控，确保通信业务稳定，需要用到以下关键技术作为保障。

3.2.1 5G 网络切片

面对社会数字化转型，5G 网络需要支撑行业场景的差异化需求，不同行业应用对于网络的服务水平协议（SLA, service level agreement）需求各不相同，例如，地铁场景可靠性需要大于 99.9%，以网络切片方式灵活支撑多元化应用的 SLA 需求，是 5G 网络建设的关键。

相比 4G，5G 网络通过将一张物理网络切分为多个具备不同特性的逻辑网络（即切片），满足地铁场景的 SLA 需求。

5G 端到端网络切片是构建地铁虚拟专网的核心方案，通过基站侧切片隔离、切片 SLA 保障、传输侧切片映射以及核心网侧切片管理实现将地

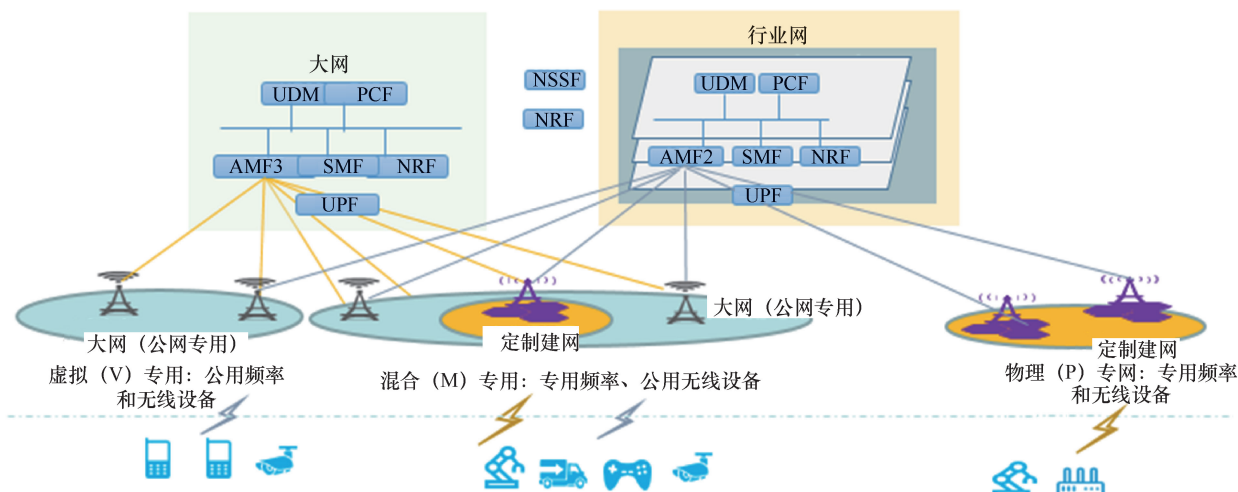


图 6 行业网与大网关系示意图

铁一张物理网络切分为多个具备不同特性的逻辑网络。

3.2.2 5QI 保障

5G 业务质量标识 (5QI, 5G quality of service identifier) 是 5G 网络所支持的 3GPP 中定义的标准。在地铁场景中, 可通过自定义 5QI 进行业务保障。核心网侧和无线侧支持 QoS 参数到传输级参数的映射, 映射规则可基于运营商配置灵活调整。在无线侧, 支持通过调整级别参数的配置, 实现相对调度优先级保障, 以及根据 5QI 按需开启专门的时延保障增强功能和可靠性保障功能。

5G 标准中的 5QI 值用于业务优先级区分。

基于 5QI 实现各业务的 QoS 保障, 是 5G 网络切片中最容易实现的方案。该切片方案通过软件配置完成业务优先级定义, 在 5G 网络发展初期, 手机用户和行业应用还在发展过程中, 软切片方案可以满足地铁业务的诉求。

通过定义不同的 5QI 业务等级, 可以实现高优先级业务优先使用网络资源。地铁业务与公网业务的特点主要是对上/下行速率带宽的需求不同。地铁业务大部分占用较多的上行带宽, 而公网业务主要来自地铁乘客上网, 以下行带宽为主。在 5G 时隙配比上行:下行为 3:7 的基础上, 通过设置不同业务优先等级, 能保证地铁业务与乘客上网业务基本不受影响。5QI 保障下用户网络使用测试结果如图 7 所示。

理论上, 在优先级用户抢占上行带宽的情况下, 普通大网用户下行业务受影响不大。在测试场景中, 优先级用户先接入网络做大数据上传, 形成上行重载; 然后普通大网用户接入进行下载业务。最终测试结论为普通大网用户的下载业务不受影响。

3.2.3 RB 保障

RB 是空口资源分配的最小单位, 在每个调度周期内, 按照频分的方式调度给终端用户, 每个 RB 包括连续的 12 个子载波, 典型的 5G NR 空口带宽为 100 MHz, 典型上下行子帧配比为 8:2, 子载波带宽为 30 kHz, 总可用 RB 数为 273 个^[12]。

在地铁各业务中, 可通过设置 RB 资源比例实现业务资源独享。通过切片技术, 实现在单条地铁线路内, 运营商同时支持 toB 和 toC 业务, 且保障线路内的 toB 业务不受 toC 业务的影响, 同时又使得运营商综合建网成本最优。届时, 不同业务通过切片进行区分及资源分配, 无线资源根据业务需求进行动态分配。

3.2.4 自动越区切换

在地铁场景中, 随着地铁的运动, 地铁用户将不断进行切换过程。

5G 网络移动性管理是 5G 网络下的一项基本功能, 通常简称为切换, 为了保障移动过程中用户设备 (UE, user equipment) 能够持续地接受网络服务, 对于在小区间移动的连接态的 UE, gNB 对 UE 的空口状态保持监控, 判断是否需要变更服务小区的过程。

基于覆盖的切换适用场景, 在连续覆盖网络中, 当 UE 移动到小区覆盖边缘时, 服务小区信号质量变差, 邻区信号质量变好时, 则触发基于覆盖的切换, 有效防止小区的信号质量变差造成的掉话^[13], 保证数据/话音业务连续性, 提升运营商网络满意度指标。

在 SA 中, 有站内切换、站间 XN 切换、站间 NG 切换 3 种系统内切换方式。其切换流程主要包括切换测量、切换决策、切换执行流程 3 步。

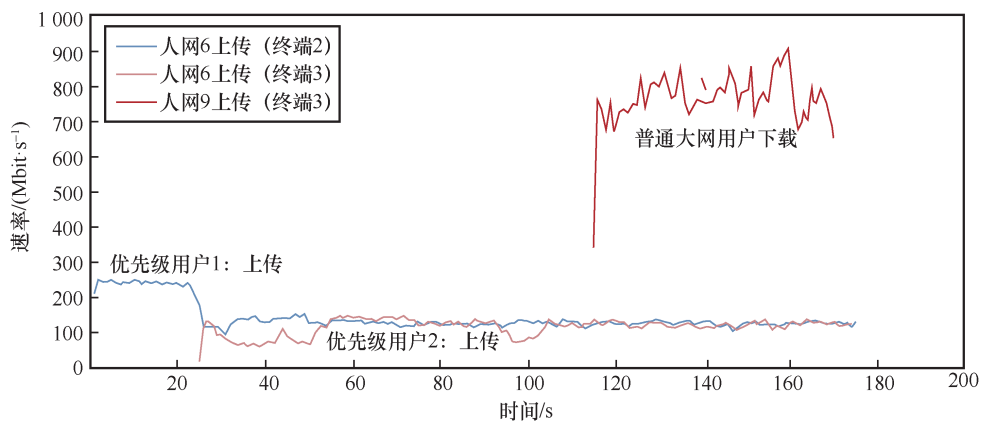


图7 5QI 保障下用户网络使用测试结果

整个切换流程采用 UE 辅助网络控制的整体思路，基站下发测量配置消息进行测量，UE 进行测量上报，基站执行切换判决、资源准备、切换执行和原有资源释放。当 UE 在 CONNECTED 模式下时，gNB 可以根据 UE 上报的测量信息来判断是否需要执行切换，如果需要切换，则发送切换命令给 UE，UE 执行切换^[14]到目标小区。

按此流程进行切换，可确保整体切换时间不大于 300 ms。

3.2.5 自动登录

在系统中，所有移动用户在开机或进入一个新基站区时均可自动登记并进行通信。gNB 之间通过 Xn 接口进行通信；gNB 与 AMF/UPF 之间通过 NG-C/NG-U 接口通信。

在使用自动登录技术时，所有移动用户在开机或进入一个新基站区时均可自动登记并进行通信，即会发生 SA 初始接入，确保业务的连续性。

3.3 性能评估

针对 A 市某地铁线路侧进行测试，整体测试结果良好，5G 覆盖率为 99.73%，VoNR 接通率为 100.00%。

针对该地铁线路站点区域进行测试，站点整体覆盖正常，5G 接入正常，各区域语音回落无异常，用户感知良好，各出口切换正常，由于该站覆盖地下无外泄情况，各站点测试结果见表 1。

针对该地铁线路地面站台层进行测试，站点整

体覆盖正常，5G 接入正常，各区域语音回落无异常，用户感知良好。各出口切换正常。地铁站厅区域信号强度实测图如图 8 所示。地铁站厅上行速率实测图如图 9 所示。

对比项	平均 RSRP/dBm	平均 SINR/dB
地下站点站厅层(B1F)	-73.26	24.35
地下站点站厅层(B2F)	-66.36	25.97
地下站点站台层(B3F)	-71.20	28.92
地上站点站台	-71.02	26.03

基于以上测试情况，针对不同业务场景，分别使用宏基站、泄漏电缆、皮站等方式覆盖，并使用 RB 预留、自动越区切换等技术，可使地铁场景下 5G 网络满足业务需求的连通性指标、信号强度指标、稳定性指标，传输速率经测试远大于 2 Mbit/s 的要求。

4 结束语

为应对未来爆炸性的移动数据流量增长、海量的设备连接、不断涌现的各类新业务和应用场景，5G 系统应运而生^[15]。地铁作为城市动脉和大众化的交通工具，随着建设里程及客运量的不断提升，需要与 5G 技术相结合，以实现轨道交通信息化、智能化。

目前，可以采用宏基站、微基站、泄漏电缆及

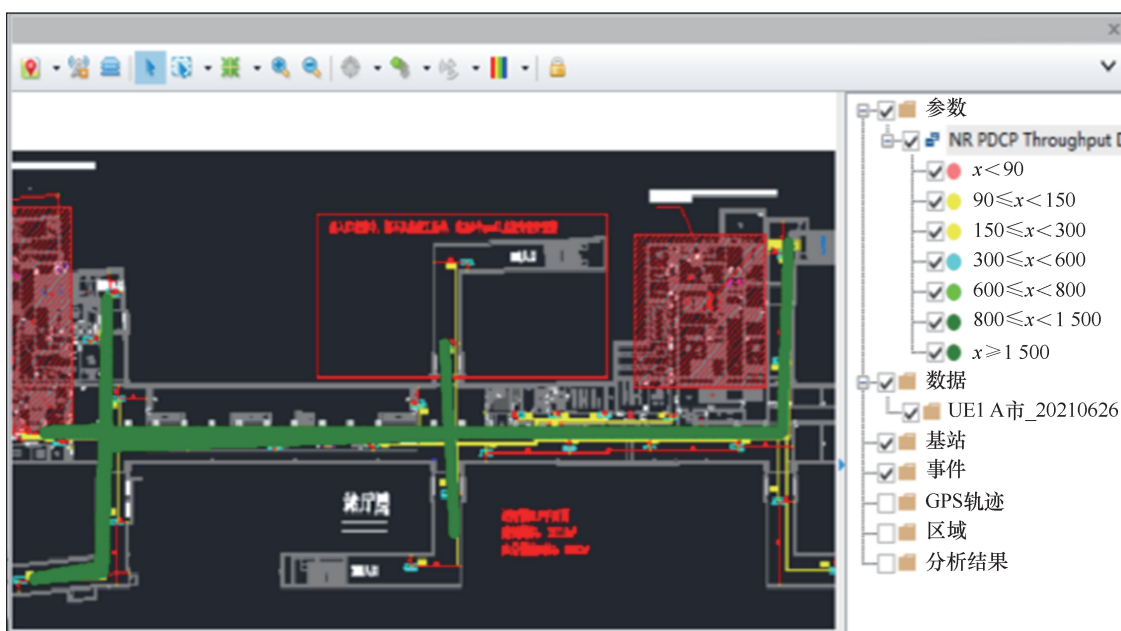


图 8 地铁站厅区域信号强度实测图

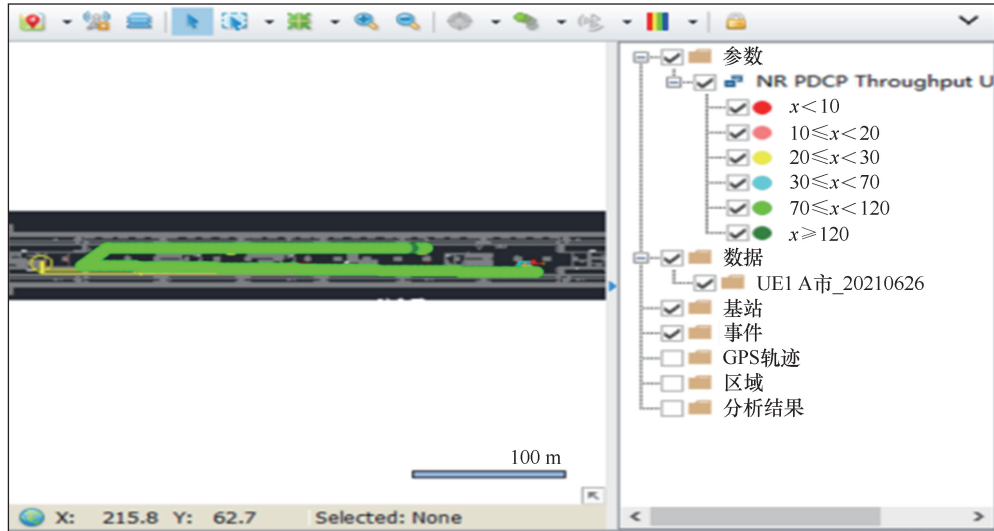


图9 地铁站厅上行速率实测图

室分基站的建设，实现地铁区域网络的立体覆盖，有效赋能地铁视频上传、传感器数据收集、自动驾驶、远程对讲等多种业务。将多种无线覆盖方式有机结合，辅以 RB 保障、自动越区切换、自动登录等技术，可极大地提升地铁网络覆盖效果，同时降低运营商建网成本。针对轨道交通中关键承载业务及关键数据，初期通过移动软切片的方式来开发应用，节省成本，远期如果数据量需求大，同时为了确保数据自主、业务独立，运营商可以将 5G 核心网部分网元下沉，地铁无线网络与移动网络进行 5G 网络共建共享。该频谱可以针对行业应用实现上行多时隙配比。非关键生产类的链接，对带宽需求较小的，可以利旧现有移动网络，实现 IoT 链接，如地铁车站未来要部署的广告屏控制系统、地铁车载的灯光感应器、多种环境感应器等。

5G 智慧地铁建设是交通强国建设的重要路径和战略突破口^[16]。地铁场景下 5G 网络立体覆盖方案为地铁网络建设提供了标准案例模板，将有效帮助 5G 智慧地铁建设，推动新兴信息技术与城市轨道交通深度融合，有效提升地铁信息化程度。

参考文献：

- [1] 颜倩. 城市轨道交通对经济高质量发展的影响研究[D]. 武汉: 中南财经政法大学, 2021.
YAN Q. Study on the influence of urban rail transit on high-quality economic development[D]. Wuhan: Zhongnan University of Economics and Law, 2021.
- [2] 谢志锋, 武宁. 5G 通信技术在城市轨道交通中的应用[J]. 中国新通信, 2021, 23(5): 11-12.
- [3] 郭周祥. 新型智慧城市考核评价指标体系研究[J]. 通信企业管理, 2021(5): 72-76.
GUO Z X. Research on the assessment and evaluation index system for new smart cities[J]. C-Enterprise Management, 2021(5): 72-76.
- [4] 布和础鲁, 陈玲. 数字时代的产业政策: 以新型基础设施建设为例[J]. 中国科技论坛, 2021(9): 31-41.
BU H C L, CHEN L. Industrial policy in the digital age: a case study of constructing new infrastructure[J]. Forum on Science and Technology in China, 2021(9): 31-41.
- [5] 陈思斌, 刘李红, 李红昌. 国家战略下济南轨道交通产业发展思路探索[J]. 铁道经济研究, 2021(5): 41-44.
CHEN S B, LIU L H, LI H C. Exploring the development of Jinan rail transit industry under national strategies[J]. Railway Economics Research, 2021(5): 41-44.
- [6] 何涛, 党选丽. 城市轨道交通 5G 公网建设思路探讨[J]. 现代城市轨道交通, 2021(12): 85-90.
HE T, DANG X L. Discussion on construction of 5G public and private networks of urban rail transit[J]. Modern Urban Transit, 2021(12): 85-90.
- [7] 洪婷, 姚楠, 张杨, 等. 基于 LTE 窄带宽的城市轨道交通无线通信系统[J]. 无线互联科技, 2020(23): 5-9.
HONG T, YAO N, ZHANG Y, et al. Wireless communication system for urban rail transit based on LTE narrow bandwidth[J]. Wireless Internet Technology, 2020(23): 5-9.
- [8] 陶成, 刘留, 邱佳慧, 等. 高速铁路宽带无线接入系统架构与关键技术[J]. 电信科学, 2010, 26(6): 95-101.
TAO C, LIU L, QIU J H, et al. Architecture and key techniques of broadband wireless access system for high speed railway[J]. Telecommunications Science, 2010, 26(6): 95-101.
- [9] XIE Z F, WU N. Application of 5G communication technology in urban rail transit[J]. China New Telecommunications, 2021, 23(5): 11-12.

- [9] 黄昊, 马耀宇. 泄漏同轴电缆在电力隧道应急通信中的应用研究[J]. 电工技术, 2021(11): 15-17, 24.
HUANG H, MA Y Y. Application of leaky coaxial cable in emergency communication of power tunnel[J]. Electric Engineering, 2021(11): 15-17, 24.
- [10] 赵俊涛, 康科武, 张丹. 高铁 5G 无线网络建设覆盖方案分析[EB]. 2020.
ZHAO J T, KANG K W, ZHANG D. Analysis of coverage plan for high-speed railway 5G wireless network construction[EB]. 2020.
- [11] 林铁力. 5G 时代高铁覆盖解决方案研究[J]. 邮电设计技术, 2020(10): 57-62.
LIN T L. Research on high speed railway coverage solutions in 5G era[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2020(10): 57-62.
- [12] 周想凌. 切片分类下短切片/短复用电力无线专网的融合构建研究[J]. 电力信息与通信技术, 2023, 21(5): 69-75.
ZHOU X L. Research on the fusion construction of short slice/short multiplexing for power system wireless private network under slice classification[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2023, 21(5): 69-75.
- [13] 黄智瀛, 白锡添, 杜安静. 5G 双频组网策略研究与应用[J]. 电信工程技术与标准化, 2021, 34(5): 45-48.
HUANG Z Y, BAI X T, DU A J. Research and application on 5G multi-frequency networking strategy[J]. Telecom Engineering Technics and Standardization, 2021, 34(5): 45-48.
- [14] 董兴芝, 李平, 孙华龙, 等. 京沪高铁沿线 LTE 网络切换性能分析[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(10): 162-165, 190.
DONG X Z, LI P, SUN H L, et al. Handover performance analysis of the LTE on Beijing-Shanghai high-speed railway[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(10): 162-165, 190.
- [15] 戴世富, 彭峰. 时空重构与具身沉浸: 5G 时代智能广告传播的新趋向[J]. 南方传媒研究, 2021(5): 58-63.
DAI S F, PENG F. Space time reconstruction and embodied immersion: a new trend in intelligent advertising communication in the 5G era[J]. Nanfang Media Research, 2021(5): 58-63.
- [16] 陆海亭, 付保明, 梁志正, 等. 5G 在城轨无线专网中的应用探索[J]. 无线互联科技, 2022, 19(9): 10-12.
LU H T, FU B M, LIANG Z Z, et al. Application exploration of 5G in private wireless network of urban rail transit[J]. Wuxian Hulian Keji, 2022, 19(9): 10-12.

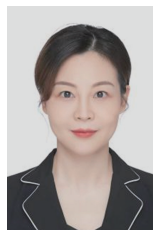
[作者简介]



王玺(1995-), 男, 中国移动通信集团设计院有限公司湖北分公司咨询设计师, 主要研究方向为 5G 专网技术及 5G 网络在行业中的应用等。



杨峥(1984-), 男, 中国移动通信集团设计院有限公司湖北分公司高级咨询设计师, 主要研究方向为 5G、云计算技术在政企领域创新应用研究等。



张鹏(1980-), 女, 中国移动通信集团设计院有限公司湖北分公司网络规划支撑所所长, 主要研究方向为通信网络规划、网络规划咨询等。



舒琴(1981-), 女, 中国移动通信集团设计院有限公司湖北分公司高级咨询设计师, 主要研究方向为通信网络规划、网络规划咨询等。



潘鑫(1988-), 男, 中国移动通信集团设计院有限公司湖北分公司随州重客中心副经理, 主要研究方向为物联网在政企行业信息化中的应用等。